

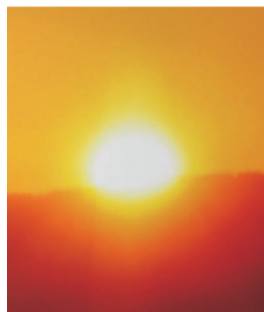
Skąd Słońce czerpie swą energię

Słońce czerpie swą energię z reakcji jądrowych, głównie z syntezy jąder wodoru, czyli protonów. Jest to kolosalna energia. Dzięki niej powstało życie na Ziemi.

Jak pisaliśmy w artykule o elektrowniach jądrowych, możliwe są takie reakcje, w których wydzielana jest energia. Tak się dzieje, gdy masa składników biorących udział w reakcji jest większa niż produktów końcowych. Mówimy wtedy o deficycie masy, który jest równoważny energii. Wiemy na przykład, że suma masy dwóch protonów (jąder wodoru) i dwóch neutronów jest większa niż tych cząstek zlepionych w całość (jądro helu, innymi słowy, cząstka alfa).

Skoro tak jest, to przy połączeniu powinna się wydzielić energia w ilości $E = \Delta mc^2$ (gdzie Δm jest różnicą mas). Niestety dwa swobodne protony i neutrony nie łączą się spontanicznie!

Jakie muszą być warunki, by je zmusić do połączenia? Nasza ziemaska intuicja podpowiada, że może trzeba je zagęścić i poddać olbrzymiemu ciśnieniu tak, aby „nie miały wyjścia” i musiały się łączyć. Otóż właśnie takie warunki panują w Słońcu.



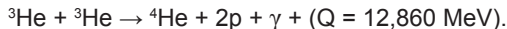
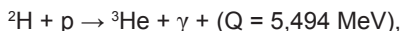
Budowa Słońca

Słońce jest olbrzymią kulą zjonizowanego gazu składającego się głównie z jąder wodoru (74%) i helu (25%). Jest to kula plazmy. Znaczący to, że atomy tracą swoją indywidualność; elektrony i składniki jąder – głównie protony i neutrony – stanowią jakby taką bardzo gęstą supę. Ta kula, jądro Słońca, jest utrzymywana w równowadze dzięki kolosalnemu przyciąganiu grawitacyjnemu i ciśnieniu gazu. Gęstość materii w jądrze Słońca wynosi $1,5 \times 10^5 \text{ kg/m}^3$, a ciśnienie osiąga aż 10^{16} Pa . Temperatura Słońca rośnie wraz z głębokością dochodząc w centrum do kilkunastu milionów stopni. W tak wysokiej temperaturze poszczególne elementy plazmy mają olbrzymią energię kinetyczną, dzięki której mogą zachodzić **reakcje syntezy jądrowej**. W przypadku Słońca jest to przemiana wodoru w hel. Na powierzchni Słońca w fotosferze gęstość wynosi już tylko 10^{-4} kg/m^3 , jest to zatem prawie próżnia.

Reakcje syntezy jądrowej

Przyjrzyjmy się dokładniej jednej z najważniejszych reakcji syntezy zachodzącej na Słońcu. Proces połączenia czterech protonów w jądro helu może zachodzić etapami zwanymi cyklami. Istnieją dwa rodzaje cykli, w których przebiega ta reakcja. Fizycy rozszyfrowali wszystkie reakcje zachodzące w jądrze Słońca.

Prawie cała (99%) energia powstaje w wyniku **cyklu proton-proton (pp)** i ten omówimy. Cykl ten ma trzy gałęzie. Najczęściej (86%) zachodzi cykl nazwany pp1. Składa się on z trzech reakcji:



W nawiasach podana jest ilość energii uwolnionej w tych reakcjach.

Przypominamy oznaczenia: p – to proton, e^+ – pozyton (antycząstka o masie elektronu, ale z ładunkiem dodatnim), ν_e – neutrino elektronowe, ${}^2\text{H}$ – deuter (ciężkie jądro wodoru, proton z neutronem), ${}^3\text{He}$ – hel (2 protony + neutron), ${}^4\text{He}$ – jądro helu (2 protony + 2 neutrony), γ – promieniowanie elektromagnetyczne o dużej częstotliwości.

Widzimy, że końcowym produktem cyklu są jądra helu, protony, pozytony oraz promieniowanie gamma, które unosi wydzieloną w reakcji energię. Jest ona transportowana do powierzchni Słońca (stałe trwają badania nad tym procesem), a następnie wysyłana w przestrzeń przede wszystkim ze światłem i promieniowaniem podczerwonym. Słońce wysyła ponadto ogromne ilości neutrino, o czym była mowa w poprzednich *Neutrinach* oraz w *Fotonie* 104, Wiosna 2009.

Jak długo jeszcze Słońce będzie świecić?

Przypomnijmy raz jeszcze: masa jądra helu jest mniejsza od masy dwóch protonów i dwóch neutronów o 0,71%, niezależnie od rodzaju reakcji, w jakiej hel powstaje. Ten ubytek masy odpowiada energii 26,732 MeV. 98% energii jest zabierane z jądra przez fotony, a 2% przez neutrino. Sugeruje to, że Słońce w trakcie swojego życia musi tracić masę, w tempie równym mocy promieniowania, które wynosi w przybliżeniu $4 \times 10^9 \text{ kg/s}$.

Gdyby przyjąć, że Słońce traci masę w takim tempie przez całe swoje życie, to dotychczasowa całkowita utrata masy wyniosłaby w przybliżeniu $6,5 \times 10^{26} \text{ kg}$. Dla porównania, wartość ta jest mniejsza niż niepewność, z jaką wyznacza się obecnie masę Słońca.

Astrofizycy przypuszczają, że Słońce powstało około 4,6 miliarda lat temu i w tym czasie zwiększyło swój promień o 8–12% oraz jasność o ok. 27%. Zawartość wodoru w jądrze młodego Słońca wynosiła ok. 73%, obecnie już tylko 40%. Gdy zapasy wodoru wyczer-



Zachód Słońca na Spitsbergenie (fot. M. Szymocha)

pią się, co nastąpi za mniej więcej kolejne 5 mld lat, Słońce zmieni się w czerwonego olbrzyma i pochłonie kilka najbliższych planet; po około miliardzie lat odrzuci zewnętrzne warstwy i zacznie zapadać się pod własnym ciężarem, przeistaczając się w białego karła. Według hipotez, przez wiele miliardów lat będzie stygło, aż stanie się obiektem zwanym czarnym karłem. Czarne karły nie są obserwowane obecnie, ponieważ Wszechświat jest jeszcze na nie za młody. Nasze dzieci i wnuki mogą spać spokojnie.

Z.G-M